

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-25

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

ESTUDO TÉCNICO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS HORIZONTAIS BULBO E VERTICAIS KAPLAN DE MESMA POTÊNCIA

R. L. A. PASSALACQUA	L. SILVA	S. Gottfried
Andritz	Andritz	Andritz
Brazil	Brasil	Austria

Resumen *– O aproveitamento da energia hidráulica do país esta em grande parte no sul e sudeste do Brasil, região de planalto, onde as possibilidades de grandes quedas são a característica, formando lagos e muitas áreas alagadas. Com toda esta área quase completamente aproveitada, existe a necessidade de expansão deste aproveitamento para as regiões norte e nordeste, onde se caracterizam por regiões de planície e também com a maior quantidade de bacias do Brasil, com rios de baixa queda, que é o ponto de análise deste trabalho.*

O projeto de unidades geradoras de grande porte esta em evolução principalmente no Brasil, devido ao período de desenvolvimento tecnológico e financeiro do país. Os rios de planalto que proporcionam altas quedas, localizados principalmente no sul do país, onde se localiza a maior parcela da população, já estão com seus aproveitamentos energéticos quase ao máximo. A grande disponibilidade para o aproveitamento energético, a partir de usinas hidroelétricas, esta no norte do país, onde os rios são largos e de planície, ou seja, com baixa queda, levando a necessidade da utilização de hidrogeradores acoplados a turbinas do tipo Kaplan.

Turbinas do tipo Kaplan, são consideradas de reação, pelo seu rotor se localizar na parte interna do flúido. O resultado energético é obtido aproveitando tanto a energia cinética, através da velocidade do fluído, e potencial, pela queda d'água. O projeto combina características radiais e axiais, e podem ser empregados dois arranjos de unidades geradoras do tipo Kaplan; verticais e horizontais, onde este último é especificamente denominado de unidade Bulbo. Os hidrogeradores que utilizam turbinas Kaplan verticais são utilizados para quedas menores que 60m e os que utilizam Kaplan horizontais (bulbo) se aplicam a quedas menores que 30 m.

Este estudo visa comparar os pros e contras entre a utilização de hidrogeradores verticais acionados por turbinas Kaplan e hidrogeradores horizontais denominados bulbo, acoplados a turbinas Kaplan Bulbo, considerando queda, vazão, número de unidades geradoras, tensão, fator de potência, potência e rotação nominal equivalente, onde são calculadas as grandezas e feitas as devidas comparações.

Palabras clave: Hidrogeradores – Bulbo – Kaplan – Estudo Técnico – Estudo Econômico

1 INTRODUÇÃO

O projeto de unidades geradoras de grande porte esta em evolução principalmente no Brasil, devido ao período de desenvolvimento tecnológico e financeiro do país. Os rios de planalto que proporcionam altas quedas, localizados principalmente no sul do país, onde se localiza a maior parcela da população, já estão com seus aproveitamentos energéticos quase ao máximo. A grande disponibilidade para o aproveitamento energético, a partir de usinas hidroelétricas, esta no norte do país, onde os rios são largos e de planície, ou seja, com baixa queda, levando a necessidade da utilização de hidrogeradores acoplados a turbinas do tipo Kaplan.

Turbinas do tipo Kaplan, são consideradas de reação, pelo seu rotor se localizar na parte interna do fluido. O resultado energético é obtido aproveitando tanto a energia cinética, através da velocidade do fluído, e potencial, pela queda d'água. O projeto combina características radiais e axiais, e podem ser empregados

* Dirección postal completa del Autor principal (opcional) – e-mail (obligatorio)

dois arranjos de unidades geradoras do tipo Kaplan; verticais e horizontais, onde este último é especificamente denominado de unidade Bulbo (ver Figura 1). Os hidrogeradores que utilizam turbinas Kaplan verticais são utilizados para quedas menores que 60m e os que utilizam Kaplan horizontais (bulbo) se aplicam a quedas menores que 30 m (Ver Figura 2).

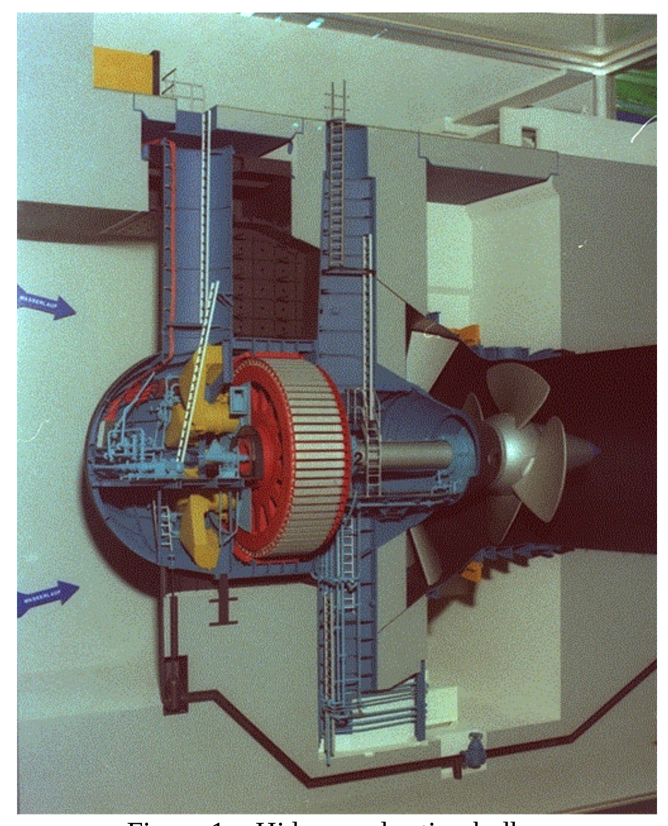


Figura 1 – Hidrogerador tipo bulbo.

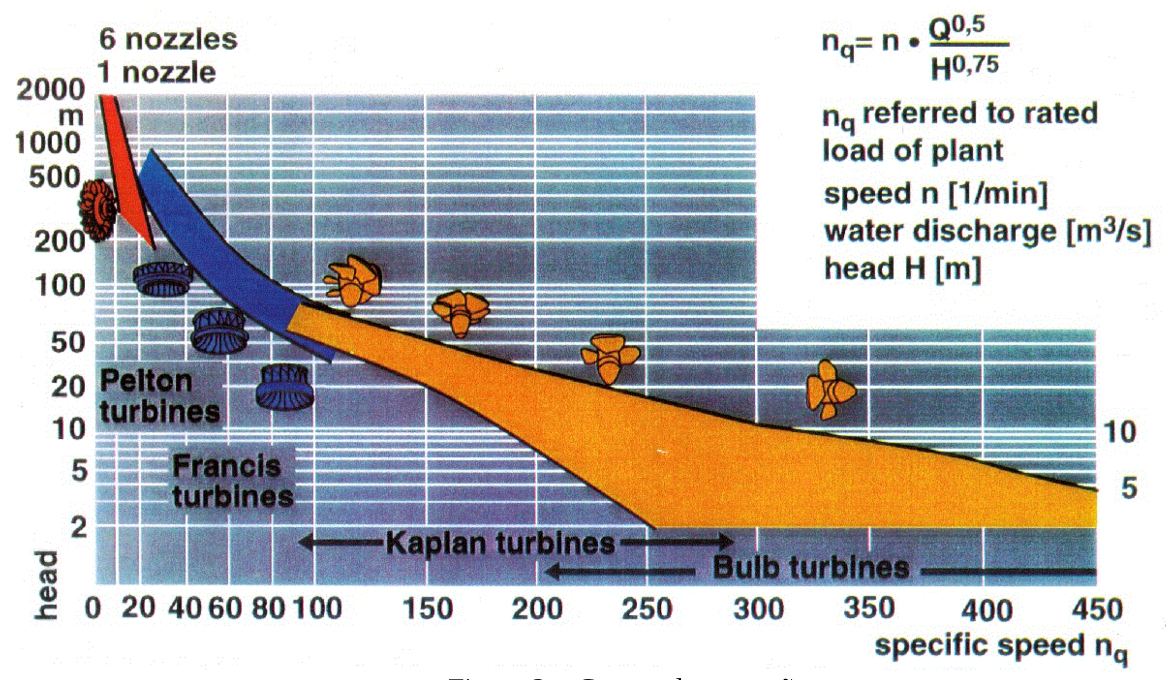


Figura 2 – Campo de operação.

Este estudo visa comparar os pros e contras entre a utilização de hidrogeradores verticais acionados por turbinas Kaplan e hidrogeradores horizontais denominados bulbo, acoplados a turbinas Kaplan Bulbo,

considerando queda, vazão, número de unidades geradoras, tensão, fator de potência e rotação nominal equivalentes, onde são calculadas as grandezas e feitas as devidas comparações.

Este é um estudo de viabilidade, comparando diversos parâmetros do funcionamento e construção de hidrogeradores de grande porte verticais ou horizontais utilizando turbinas Kaplan.

O Crescimento na demanda por energia requer a utilização de um hidrogerador otimizado, a perfeita solução para a geração de energia para pequenas quedas deve ser empregada.

2 GENERALIDADES

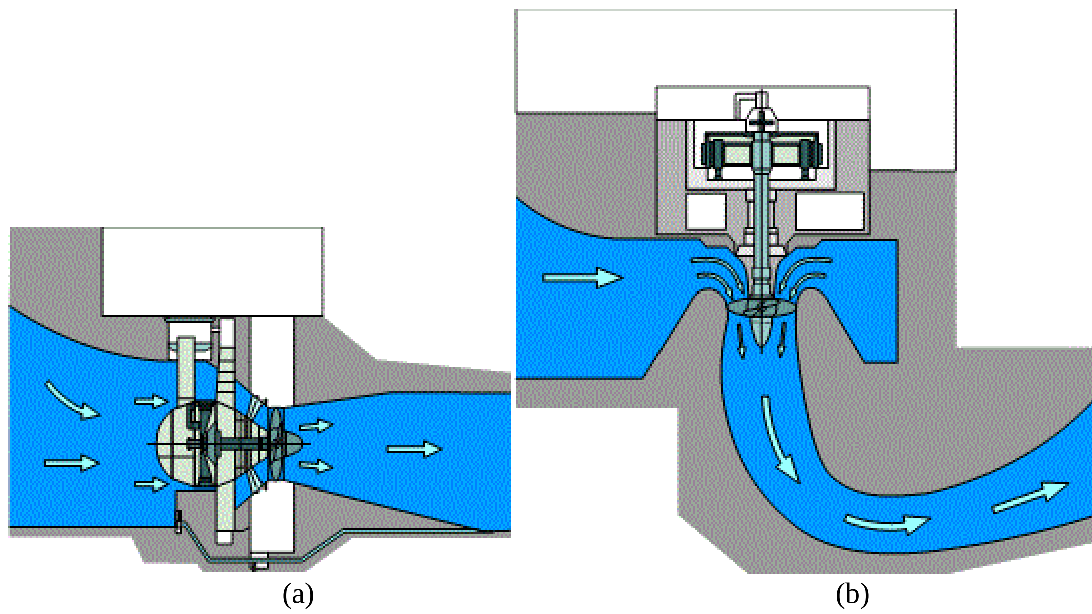
A grande demanda por energia requer, no caso de hidrogeradores, o aproveitamento ótimo da energia hidráulica. A solução perfeita para transformar energia hidráulica em pequenas quedas, ou seja, hidroelétrica com pouca ou mesmo nenhum estoque de água. Este tipo de hidroelétrica tem queda variando de 5 a 60 m e são tradicionalmente equipadas com turbina Kaplan.

A comparação entre a utilização de máquinas utilizando turbinas Kaplan verticais e horizontais (bulbo), consiste na analise de alguns fatores:

- A eficiência hidráulica;
- Condições de operação;
- Impacto ambiental;
- Custos na construção civil;
- Tempo de montagem;
- Acesso para manutenção;
- Condições de operação.

2.1 Eficiência Hidráulica

Na Figura 3 observa-se o comportamento do fluxo de água nas duas condições de análise, numa visão de corte da casa de força.



(a) (b)

Figura 3 – Diferença no fluxo de água nas duas condições de análise. (a) Horizontal bulbo; (b) Vertical Kaplan.

Analisando o comportamento do fluxo da Figura 3, observa-se que na condição da Figura 3(a) o fluido é mais estável resultando em menor perda comparando-se com a condição da Figura 3(b).

2.2 Considerações de Operação

Na Tabela 1 são apresentadas as principais condições de operação, que serão analisadas para a comparação entre as duas opções de montagem.

Tabela 1 – Condições de operação.

	Kaplan Vertical	**Horizontal Bulbo**
Capacidade Instalada [MW]	2 x 71,26	2 x 72,14
Queda [m]	17,3	
Vazão de Operação [m^3/s]	450	
Número de Unidades	2	
Voltagem Nominal [kV]	13,8	
Fator de Potência	0,9	
Produção de Energia Média Anual [GWh]	733,7	743,8
Rotação Nominal [rpm]	80	90
Rotação de Disparo [rpm]	240	270
Diâmetro da Turbina [m]	7,5	7,4
Eficiência nas condições normais de operação [%]	93,82	94,98

2.3 Impacto Ambiental

Usinas hidroelétricas do tipo bulbo se caracterizam pelo seu baixo impacto ambiental, sendo que não necessita de altas quedas para o aproveitamento energético, na Tabela 2 apresenta-se uma comparação das relações entre área de reservatório e potência de algumas usinas na Região Amazônica.

Tabela 2 – Usinas Hidroelétricas da Região Amazônica – Área de Reservatório versus potência [1].

Usina	**Área do Reservatório [km^2]**	**Potência [MW]**	**Área Reservatório/Potência da Usina [km^2/MW]**
Balbina	2360	250	9,44
Samuel	584	217	2,69
Manso	387	210	1,84
Tucuruí (Francis)			
1a. Etapa	2414	4000	0,61
2a. Etapa		8000	0,30
Jirau (Bulbo)	258	3300	0,08
Santo Antônio (Bulbo)	271	3150	0,086

Da Tabela 2 observa-se que a utilização de hidrogeradores do tipo bulbo apresenta um excelente relação entre área de reservatório e potência gerada, sendo de grande importância para a preservação do meio ambiente.

2.4 Custos na Construção Civil

A parte referente a construção civil de hidroelétrica, consiste no maior custo de execução da obra, nesta etapa apresenta-se um estudo da distribuição de duas máquinas do tipo bulbo em comparação com duas máquinas do verticais utilizando turbinas Kaplan, na Figura 4 observa-se o tamanho da área da casa de força entre os dois tipos de máquina em análise.

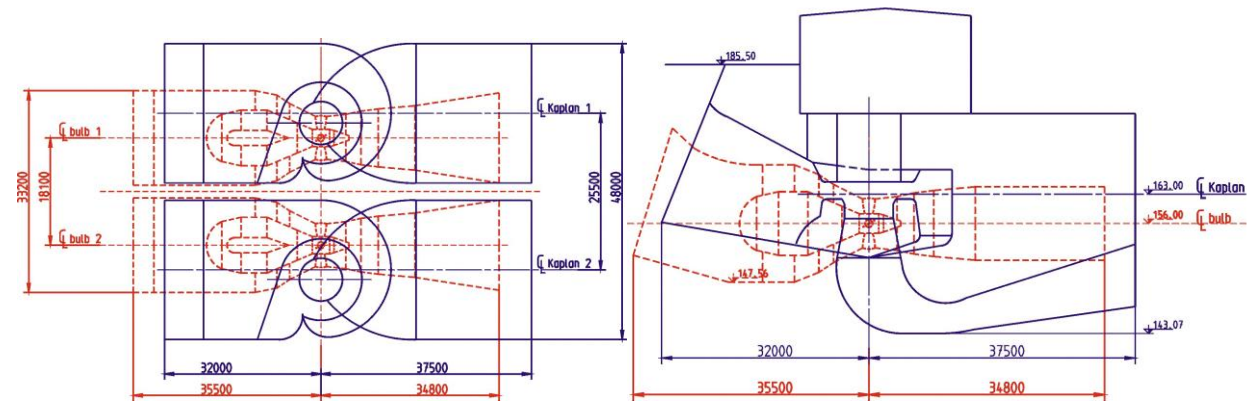


Figura 4 – Comparação entre a área das casas de força.

Na Figura 5 observa-se a diferença em volume da casa de força.

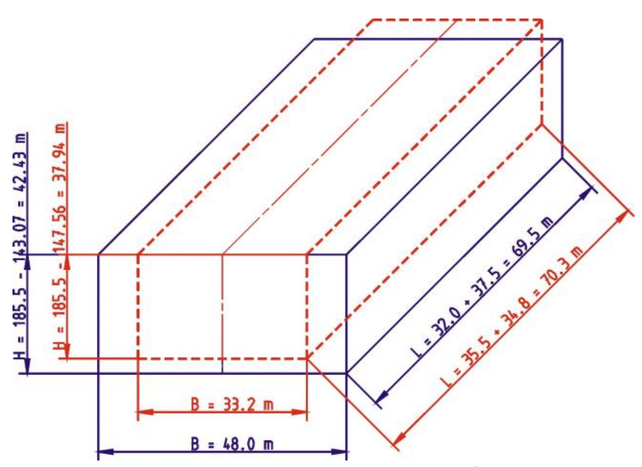


Figura 5 – Volume da casa de força.

Kaplan Vertical: $V = 42{,}43\ m\ x\ 48{,}0\ m\ x\ 69{,}5\ m = 141{,}55\ m^3$
Bulbo: $V = 37{,}94\ m\ x\ 33{,}2\ m\ x\ 70{,}3\ m = 88{,}55\ m^3$

Para máquinas bulbo a diferença no volume, para esta análise é de 53 m^3, resultando em uma redução volumétrica de 37,44 %, gerando redução nos custos da parte civil e tempo de construção.

Para uma comparação de custos são analisadas as turbinas, geradores, BoP and aço para estruturas hidráulicas. Para o caso de turbinas e geradores os gastos com máquinas do tipo bulbo são ligeiramente menores, pois o diâmetro das palhetas é menor, a velocidade nominal é mais elevada e o número de pólos para o gerador são menores. A comparação na Tabela 3 é uma composição simplificada da casa de força.

Tabela 3 – Custo de construção simplificado.

	Kaplan Vertical [%]	**Bulbo [%]**
Turbina + Aço para estruturas hidráulicas	23	22
Gerador + Equipamentos elétricos	23	22
Trabalho Civil (Casa de Força)	44	40
Custo de investimento, planejamento, supervisão e consultas	10	10
Casa de força completa	100	94

Da análise da Tabela 3 observa-se que a utilização de máquinas bulbo reduz o custo em 6 %.

2.5 Tempo de Montagem

O tempo de montagem de uma máquina é um fator importante, pois com um tempo menor na montagem, obtem-se um ganho maior na operação da máquina. Com os trabalhos da civil finalizado, na Tabela 4, observa-se a comparação do tempo de montagem entre a Kaplan vertical e uma máquina bulbo.

Tabela 4 – Tempo de montagem.

Tipo de máquina	**Tempo médio de montagem**
Máquina Bulbo	9 meses
Kaplan Vertical	12 meses

Analisando a Tabela 4, observa-se um ganho médio de 3 meses na montagem das máquinas, o que conforme dados elétricos observados na Tabela 1, gerarinha um ganho de 186 GWh, o que dependendo do valor do kW, pode ser consideravel, equação abaixo:

$$M = X\left[{}^{\$}/_{kWh}\right]\ x\ 186.000.000$$

Onde,
X – Tarifa de valor do kWh;
M – Retorno financeiro para três meses de adiantamento de operação.
Na Figura 6 observa-se a comparação da montagem entre dois tipos de hidroelétrica, uma usina com 9 máquinas bulbo e uma usina com 9 máquinas Kaplan Vertical.

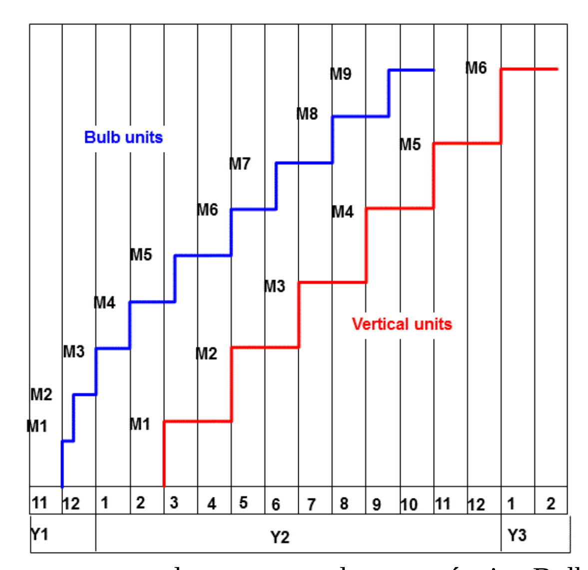


Figura 6 – Comparação entre o tempo de montagem de uma máquina Bulbo e uma Kaplan Vertical.

Analisando a Figura 6, que foi feita baseada em duas hidroelétrica uma utilizando máquinas do tipo bulbo contendo 9 unidades e a segunda utilizando máquinas do tipo Kaplan Vertical com 9 unidades, ambas com potência de aproximadamente 38 MVA, observa-se que devido a menor quantidade de trabalhos civis o início das montagens se da 3 meses antes no caso de máquinas bulbo, e a finalisação de toda a montagem da casa de força se da em até 11 meses, e com a utilização de Kaplan Vertical estariam montadas apenas 6 máquinas em apeoximadamente 12 meses. Resultando em um ganho de 546 GWh no caso das máquinas do tipo bulbo.

2.6 Acesso para Manutenção

Manutenção é um item primordial e muito importante para o bom funcionamento de todos os tipos de máquinas em especial as rotativas, para uma máquina do tipo Kaplan Vertical, caso seja necessário alguma manutenção na turbina em muitos casos todas as peças do geradore precisam ser removidas, gerando grande tempo para a desmontagem, e após a finalização da manutenção, remontagem e todos os controles dimencionais que necessitam ser feitos. Para uma máquina do tipo bulbo, por ser horizontal, existem duas aberturas, uma para acesso ao gerador e outra para acesso a turbinas, desta forma, caso seja necessário alguma manutenção na máquina, tem-se acesso a turbina sem a necessidade de desmontar o gerador, fazendo com que a volta da máquina para a rede seja mais rápida.

2.7 Condições de Operação de uma Máquina Bulbo

Neste item serão apresentadas algumas particularidade de máquinas bulbo.

2.7.1 Sistema de resfriamento do ar

A localização de uma máquina bulbo enclausurada na passagem de água, permite a utilização da água do rio para resfriamento, o que pode ser observado na Figura 7. As máquinas que assumem este tipo de condição são as de menor diâmetro e respeitam certos requisitos de temperatura da água, onde as trocas de calor são menores, as máquinas de maior diâmetro necessitam de trocadores de calor ar-água, para refrigerar o ar mantendo o funcionamento adequado do enrolamento do estator e rotor.

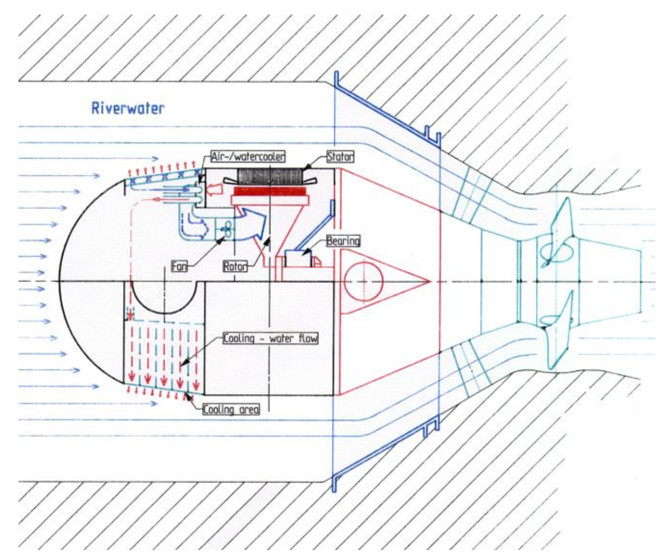


Figura 7 – Detalhe do sistema de resfriamento sem trocadores de calor.

A inércia (GR^2) da máquina, influenciam a velocidade da turbina e sua regulação, para operações em condições normais de projeto é facilmente atingido, para algumas operações isoladas, um efeito de inércia maior é requerido, para máquinas do tipo bulbo, existem duas formas de atingir este efeito:

- Aumentar a massa do rotor do gerador;
- Aumentar o diâmetro do bulbo.

2.7.2 Transferencias das forças para a casa de força

As forças geradas por uma máquina bulbo (massa, flutuabilidade, forças hidráulicas, cargas e curto circuito) são transferidas por algumas vias pré-definidas (Figura 8)

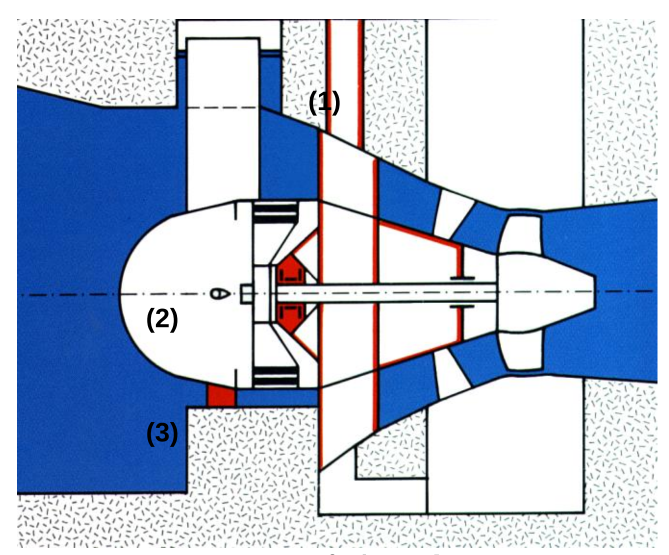


Figura 8 – Transferência de cargas.

Na Figura 8, na Coluna Central, indicado por (1), absorve todas as cargas axiais, radiais e forças devido ao torque, na indicação (2) suportes laterais, são responsáveis por estabilizar o nariz do bulbo e na indicação (3) suporte vertical, suporta o peso do gerador durante a montagem e durante a operação absorve as forças devido a flutuabilidade.

3 CONCLUSÃO

As vantagens da utilização de hidrogeradores do tipo bulbo em comparação a utilização da Kaplan vertical são apresentadas abaixo:

- Maior eficiência hidráulica, devido ao fluxo de água na horizontal, menor perda de carga, resultando em maior produção anual;
- Melhor integração na paisagem (menor impacto ambiental), devido as dimensões da casa de força serem bem menores;
- Menor quantidade de remoção de materiais, reduzindo os custos de Engenharia Civil e de construção (custo até 30% menor para a casa de força);
- Menor tempo de montagem;
- Melhor acesso para a manutenção de peças da turbina, sem a necessidade de desmontar todo o gerador para a remoção de um determinado item da turbina.

Além das questões relativas ao tamanho, em hidrogeradores do tipo bulbo, uma análise prévia indicou que o tempo de montagem da máquina bulbo reduz-se, na média, em 3 meses quando comparado com um Kaplan vertical, devido principalmente a menor quantidade de peças que necessitam serem montadas no poço na etapa final de montagem, o que dependendo do valor do kWh, resultaria em um ganho considerável.

Por vários motivos já apresentados, a utilização de turbinas do tipo bulbo possui muitos atrativos e certamente será alvo de buscas para o futuro da hidro energia no país, tanto na implantação quanto em pesquisas na área.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Dziedzic, M. “Pareceres dos Consutores sobre o Estudo de Impacto Ambiental do Projeto para Aproveitamento Hidrelétrico de Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira - RO” Parecer Técnico sobre Tecnologia Hidráulica de 2005.

[2] ANDRITZ, “Comparison Vertical Kaplan vs. Horizontal Bulb”, Internal study, 2000.